



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

hochschule 21
genial dual

KATHODENREZIRKULATION

**Regloptimierung der Sauerstoffzudosierung eines
Notfallbrennstoffzellensystems**

BACHELORARBEIT

ROBIN AUFFERMANN

14.MÄRZ 2014

ARBEIT MIT SPERRVERMERK

vorgelegt von: Robin Auffermann
Studienbereich: Mechatronik DUAL
Matrikelnummer: 51026
Zeitraum: Januar-März 2014
Abgabedatum: 14.03.2014
Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Thorsten Uelzen
Zweitgutachter: Dr.-Ing. habil. Claudia Werner
Hochschule: hochschule 21 gGmbH
Harburger Straße 6
21614 Buxtehude



In Zusammenarbeit:

Unternehmen: Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e.V. (DLR)
in der Helmholtzgemeinschaft
Institut für Technische
Thermodynamik
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**



Inhaltsverzeichnis

Schutzklausel	III
Kurzreferat / Abstract	IV
Eidesstattliche Erklärung	V
Danksagung	VI
Symbole und Abkürzungen	IX
Abkürzungen	IX
Lateinische Symbole	X
Chemische Symbole	XI
Griechische Symbole	XI
Physikalische Konstanten	XI
Glossar	XII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Ziel der Arbeit	3
1.3 Problemstellung	4
1.4 Aufgabenstellung	4
1.5 Aufbau der Arbeit	4
1.6 Vorausgesetzte thematische Kenntnisse	5
2 Grundlagen und Stand der Technik	7
2.1 Berechnung der Reaktanden	7
2.2 Berechnung mechanischer Größen	9
2.3 Regelungstechnische Grundlagen	10
2.4 Stand der Technik	12
3 Theoretische Betrachtung	13
3.1 Methoden zur Regelungsoptimierung	13
3.2 Betrachtung des Kathodenmedienstroms	14
3.3 Notfalllastprofil	15
4 Experimenteller Versuchsaufbau	17
4.1 Entwicklungsstadium der Teststandumgebung	17
4.1.1 mechanische RK-Kreis Komponenten	20
4.1.2 Sensorik des RK-Kreis	22
4.1.3 Sauerstoffzudosierung	26
4.2 Modifikation des Teststands	30
5 Versuchsdurchführung	36
5.1 Neuer RK-Kreis mit alter Regelung	37
5.2 Neuer RK-Kreis mit zusätzlicher Störgrößenaufschaltung	37
5.3 Neuer RK-Kreis mit neuen Regelparametern	39

6 Diskursive Auswertung der Versuche	41
6.1 O ₂ Regler nicht optimiert	41
6.2 O ₂ Regler optimiert	48
7 Zusammenfassung	53
8 Ausblick	54
9 Fazit	55
Literaturverzeichnis	56
Abbildungen	58
Tabellen	61
Anhang	i
Anhang A	i
Anhang B	v
Anhang C	vi
Anhang D	vii
Anhang E	xi
Anhang F	xvii
Anhang G	xviii
A.1 Wissenschaftliches Poster	xix

Symbole und Abkürzungen

Abkürzungen

<i>Akronym</i>	<i>Ausführung</i>
Amb.	Ambiente (Umwelt, Umfeld, Umgebung)
Atm.	Atmosphäre (atmosphärisch)
APU	Auxiliary Power Unit (XII)
BZ	Brennstoffzelle (XII)
BZ-Stack	Brennstoffzellenstack (XII)
BZ-System	Brennstoffzellensystem
CAN	Controller Area Network (XII)
DC	Direct Current
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DLV	Dynamische Leistungsvermessung
FC	Fuel Cell / Brennstoffzelle (XII)
HMI	Human Machine Interface
HT	Hochtemperatur im PEM-Systembereich (120 - 190 °C)
IATA	International Air Transport Association (XII)
I/O System	Input/Output System
ITT	Institut für technische Thermodynamik
kW	Kilowatt = 1000 W
LWL	Lichtwellenleiter
MB	Messbereich
MEA	Membrane Electrode Assembly (XII)
MFC	Mass Flow Controller
MFFCI	Multifunktional Fuel Cell Integration
MW	Megawatt = $1 \cdot 10^9$ W
NT	Niedertemperatur im PEM-Systembereich (50 - 80 °C)
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
PEM	Proton Exchange Membrane (XII)
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PID	Proportional Integral Differential
ppm	parts per million / Teile von einer Million (10^{-6})
RAT	Ram Air Turbine (XII)
rF	relative Feuchte
RK - Kreis	rezirkulierter Kathodenkreis
SI	International System of Units
slpm	Standard Liter pro Minute
UN/DESA	Department of Economic and Social Affairs

Lateinische Symbole

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
A	m ²	Fläche
G°	$\frac{kJ}{mol}$	Gibb'sche Energie = Freie Enthalpie
H°	$\frac{kJ}{mol}$	molare Enthalpie (XII)
I	A	elektrischer Strom (Ampere)
K _D	[]	Differentialverstärkungsfaktor
K _I	[]	Integrationsverstärkungsfaktor
K _P	[]	Proportionalverstärkungsfaktor
K _{P,krit}	[]	kritischer Proportionalverstärkungsfaktor
l	m ³ · 10 ⁻³	Liter ⇒ 1 dm ³
ṁ	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
n	[]	Anzahl und Menge
p	Pa	Druck (Pascal ⇒ 1 Pa = 1 $\frac{kg}{m \cdot s^2}$)
Q	C	elektrische Ladung (1 Coulomb ⇒ 1 A · 1s)
r	m	Radius
s _{Latenz}	m	
S°	$\frac{J}{mol \cdot K}$	molare Entropie (XII)
t	s	Zeit
T	K	Temperatur (Kelvin)
T _{krit}	s	Periodendauer bei kritischer Verstärkung (K _{P,krit})
T _{Latenz}	s	Latenzzeit
T _n	s	Nachstellzeit
T _v	s	Vorhaltzeit
U	V	Spannung (Volt)
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
v ₁	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit bei einem slpm
v _{dyn}	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit in Abhängigkeit zu V̇
V̇	slpm	Volumenstrom (Hier bedarfsweise auch in $\frac{l}{s}$ oder $\frac{m^3}{s}$ zu finden)
V̇ _(slpm)	[]	Volumenstrom in slpm als reiner Faktor
W	$\frac{kg \cdot m^2}{s^3}$	Watt (XII)

Chemische Symbole

<i>Symbol</i>	<i>Beschreibung</i>
H ₂	Molekularer Wasserstoff
H ⁺	Wasserstoff-Kation / Proton
H ₂ O	Wasser
O ₂	Molekularer Sauerstoff

Griechische Symbole

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
η	%	Wirkungsgrad
λ	[]	Stöchiometrie
π	[]	Kreiszahl
Δ	[]	Änderung / Differenz

Physikalische Konstanten

<i>Konstante</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
$q = 1,60219 \cdot 10^{-19}$	As	Elementarladung
$F = 9,64853 \cdot 10^4$	As mol ⁻¹	FARADAY-Konstante
$N_A = 6,02214 \cdot 10^{23}$	mol ⁻¹	AVOGADRO-Konstante
$\pi = 3,14159...$	[]	Kreiszahl